

УДК 628.1.16(477+476.5)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АЭРАЦИИ ВОДЫ ПРИ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИИ

*д-р техн. наук, проф. В.О. ОРЛОВ; канд. техн. наук, доц. А.М. ОРЛОВА*  
(Национальный университет водного хозяйства и природопользования, Украина);  
*канд. техн. наук, доц. Д.П. КОМАРОВСКИЙ*  
(Полоцкий государственный университет)

*Представлены результаты многолетних исследований процесса обезжелезивания на действующих станциях Украины и Беларуси. Исследования проводились на фильтрах с песчаной, щебеночной и пенополистирольной плавающей загрузках. Обосновывается, что при обезжелезивании подземных вод с малой концентрацией железа важно обеспечить достаточную аэрацию воды до поступления ее в загрузку, в которой процесс задержания гидроксида железа проходит идентично во всех приведенных типах загрузок.*

В системах водоснабжения населенных пунктов Украины, Беларуси и других стран мира важное место занимают сооружения подготовки воды. Стоимость таких сооружений достаточно высокая и это может быть решающим фактором при обосновании всей системы водоснабжения. В таком случае наиболее целесообразно использовать подземные источники с небольшим содержанием железа, которое чаще всего удаляется из воды интенсивной аэрацией и фильтрованием через разного типа сыпучие материалы [1–7].

Подземные воды водоносных горизонтов отдельных областей Украины: Хмельницкой (с. Плужное); Винницкой (г. Шепетовка, с. Бохонники, с. Новые Обиходы); Ровенской (Новый Двор, с. Горбаков, Франивка, Терентий, Деревяне, Грабов, п. г. т. Гоша), а также Беларуси (г. Полоцк) характеризуются содержанием железа до  $2,5 \text{ мг/дм}^3$ , присутствием сероводорода, марганца, избыточной углекислоты, достаточно высокими значениями водородного показателя и щелочности [4; 6–7]. Одним из наиболее простых, недорогостоящих и распространенных методов обезжелезивания является безреагентный метод, основанный на упрощенной аэрации с последующим фильтрованием, или контактным обезжелезиванием воды [6; 7] при высоких значениях pH и щелочности. При этом предусматривается подача аэрированной воды сразу на фильтры без предварительного ее отстаивания. По мере фильтрования на зернах загрузки появляется пленка из коллоидов железа, которая в дальнейшем служит катализатором физико-химического процесса обезжелезивания воды. О присутствии пленки на зернах загрузки свидетельствует изменение цвета зёрен [2–6]. В качестве фильтрующих загрузок могут использоваться песок, щебень, керамзит, цеолит, пенополистирол с самым различным фракционным составом, начиная от мелкого (0,5 мм) и заканчивая достаточно крупным (5 мм и более) [1; 3–4]. На Горбаковской станции обезжелезивания используется щебень; на Гошанской – пенополистирол; на Полоцкой – песок.

На всех трех станциях вода интенсивно аэрируется: на Горбаковской и Гошанской – путем свободного многократного излива; на Полоцкой – вода насыщается воздухом, проходя через водовоздушный насос (эжектор), и далее – за счёт излива в корпусе фильтра.

Фильтрование воды на Горбаковской и Полоцкой станциях предусматривается сверху вниз в направлении увеличения крупности зерен тяжелой загрузки, на Гошанской – снизу вверх и также в направлении увеличения крупности гранул пенополистирола. Все исследуемые фильтры имели по высоте пробоотборники для отбора проб воды и фиксирования ее качественных показателей по мере прохождения загрузки.

**Результаты исследований.** Концентрация железа в исходной воде Горбаковской станции в среднем составляет  $1,83 \dots 2,08 \text{ мг/дм}^3$ . На станции предусмотрено две ступени аэрации подземной воды – во входной камере и над центральными каналами фильтров. Во входной камере предусмотрен обычный излив воды с высоты 0,5...0,6 м. При повышении расхода выше расчетного, обычно в ночное время, эта высота может понижаться. Для повышения аэрации в каждом фильтре установлен аэратор над центральным каналом. Аэратор представляет собой лоток шириной 250 мм и длиной 4 м. В середине лотка приварены перегородки с шагом 0,2 м на высоту немного меньше высоты лотка. Вода обогащается кислородом за счет турбулизации и последующего свободного излива потока. Однако эффективность его работы зависит от горизонтальности устройства этих перегородок, самого лотка и подаваемого расхода воды. Поэтому на отдельных фильтрах наблюдались неравномерные потоки по всей длине лотков. Исследование эффективности аэрирования воды проводилось для двух периодов – максимальной (тарифная зона «ночь») и минимальной (тарифная зона «пик») – подачи воды на станцию обезжелезивания. В периоды максимальных нагрузок аэратор во входной камере практически полностью был затоплен. Определение концентрации растворенного кислорода в воде проводилось методом Винклера. Для исключения возможности попадания воздуха в исследуемую воду во время отбора пробы воды отбирались в кислородные стаканы при помощи сифонной трубки. На рисунках 1, 2 представлен процесс аэрации воды на Горбаковской станции.



Рисунок 1 – Камера аэрации



Рисунок 2 – Аэрационный желоб и фильтр

На Горбаковской станции очистки воды обеспечивается 16-ю фильтрами, которые размещены на двух самостоятельных блоках. Фильтры загружены гранитным щебнем. Толщина слоя загрузки составляет приблизительно 1,9 м. Гранулометрический состав загрузки фильтра № 1 представлен на рисунках 3 и 4).

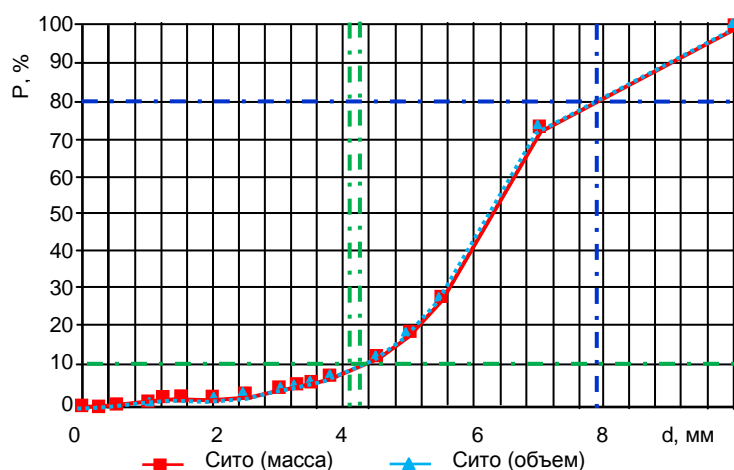


Рисунок 3 – Гранулометрический состав загрузки фильтра № 1



Рисунок 4 – Загрузка после классификации

Кислород в поступающей на станцию воде отсутствует. Изменение его концентрации на первом блоке после аэрации и прохождения загрузки представлено на рисунке 5.

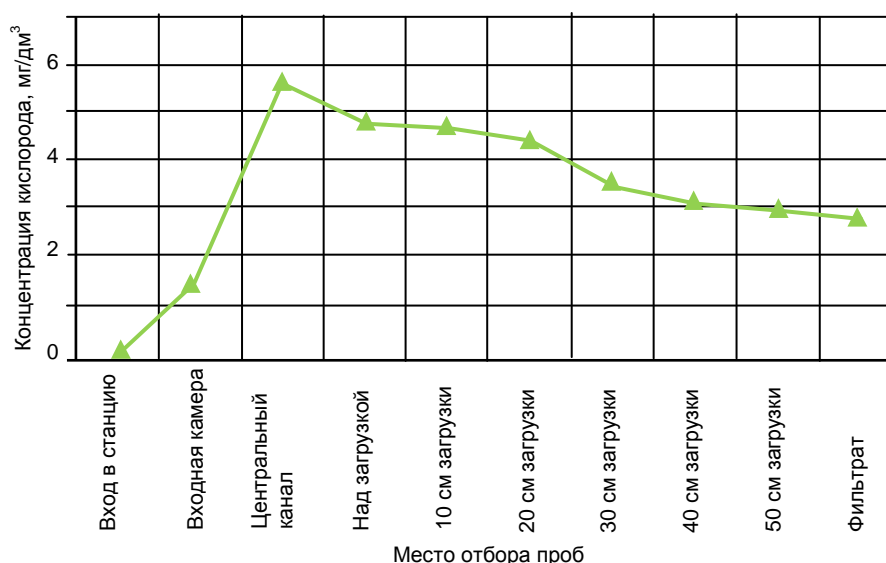


Рисунок 5 – Изменение концентрации кислорода при минимальной подаче воды на станцию

Параллельно с отбором проб на содержание кислорода отбирались пробы на содержание закисного и окисного железа (рис. 6). При общей концентрации железа  $2,06 \text{ мг/дм}^3$  в исходной воде двухвалентное железо составляло 95,1%, перед загрузкой – 73,7%, в первых слоях это соотношение уменьшалось до 44...49% и в дальнейшем практически не изменялось. Эффективность обезжелезивания составляла 95%, в фильтрате концентрация железа доходила до  $0,11 \text{ мг/дм}^3$ .

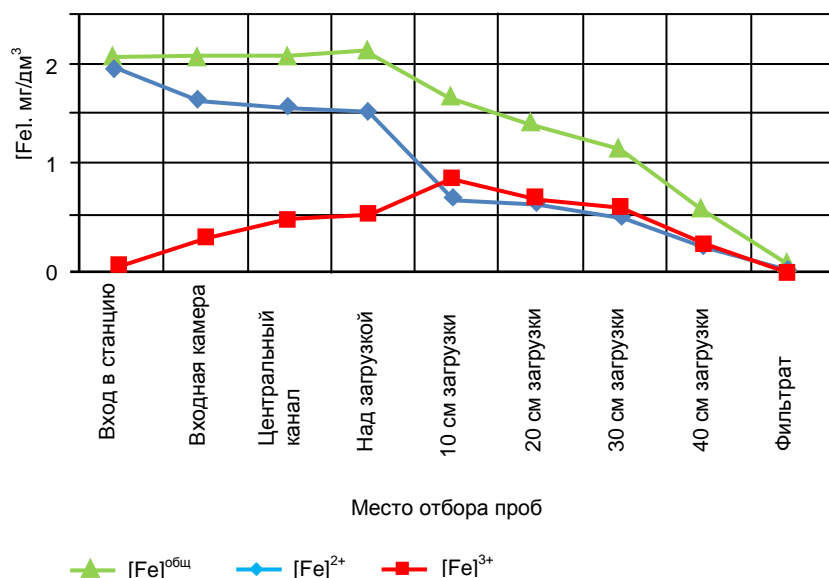


Рисунок 6 – Изменение концентрации железа при минимальной подаче воды

Результаты исследований концентрации кислорода при максимальной подаче воды на станцию представлены на рисунке 7.

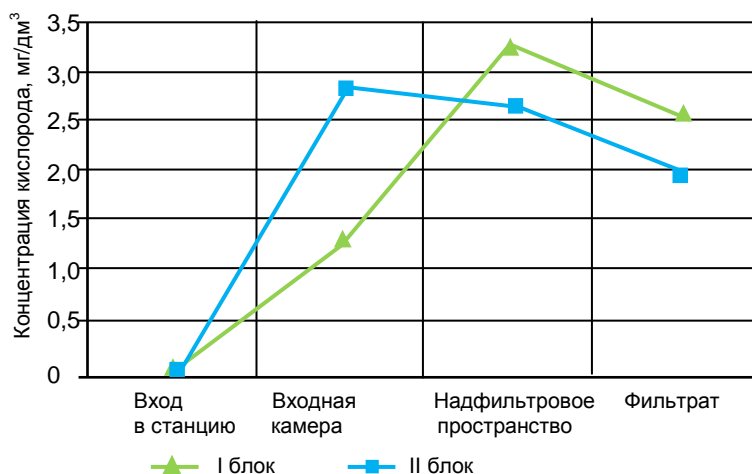


Рисунок 7 – Изменение концентрации кислорода при максимальной подаче воды на станцию

Концентрация кислорода во входных камерах блоков отличается, что связано с различными высотами аэрации воды – на втором блоке высота меньше и изменяется в зависимости от подаваемых расходов воды. Через практически полное затопление лотковых аэраторов на втором блоке станции концентрация кислорода в надфильтровом пространстве фильтров этого блока меньше. И как следствие, концентрация кислорода в фильтрате первого блока выше, о чем свидетельствуют данные таблицы.

Согласно стехиометрическим расчетам на окисление 1 мг закиси железа надо  $0,143 \text{ мг}$  «активного» кислорода. В то же время экспериментальные исследования показывают [1–5], что реально для химического окисления железа удельные расходы кислорода на 1 мг железа при его концентрации до  $5 \text{ мг/дм}^3$

составляют не менее 0,8...1,0 [1; 4]. Одновременно нужно учесть расход кислорода на окисление сероводорода, составляющий 2,25...2,5 мг. В итоге, расчетное количество кислорода для окисления железа и сероводорода составит  $2,1 \cdot 1 + 0,5 \cdot 2,5 = 3,35$  мг/дм<sup>3</sup>.

Так как концентрация кислорода в воде меньше расчетной, то процесс обезжелезивания аэрацией может быть незавершенный, и в этот период работы станции фильтрат будет иметь повышенную концентрацию железа, что подтверждается наблюдениями за работой станции. Заметное поглощение кислорода происходит в первых слоях загрузки.

#### Концентрация кислорода в воде при максимальной подаче воды на станцию

Место отбора пробы	Время отбора	Концентрация кислорода, мг/дм <sup>3</sup>
Вход в входные камеры	01 часов 10 минут	0,098
Входная камера блока I	01 часов 10 минут	1,34
Надфильтровое пространство фильтра № 2 блока I	01 часов 10 минут	3,21
Фильтрат фильтра № 1 блока I	01 часов 10 минут	2,58
Входная камера блока II	03 часов 00 минут	2,83
Надфильтровое пространство фильтра № 14 блока II	03 часов 00 минут	2,69
Фильтрат фильтра № 14 блока II	03 часов 00 минут	1,97

На **Гошанской станции** контактного обезжелезивания воды исходная вода поступает в ступенчатый аэратор (рис. 8), где происходит насыщение воды воздухом и отдувается сероводород, далее вода проходит вниз по вертикальному воздухоотделителю. Их на станции два – один для трёх фильтров диаметром 1,4 м и одного диаметром 1,2 м; второй для карусельного фильтра диаметром 2,7 м из четырех секций. Из нижней части воздухоотделителей вода поступает в нижнюю часть пенополистирольных фильтров, проходит вверх через пенополистирольную загрузку и обезжелезенной собирается в надфильтровом пространстве (рис. 9).

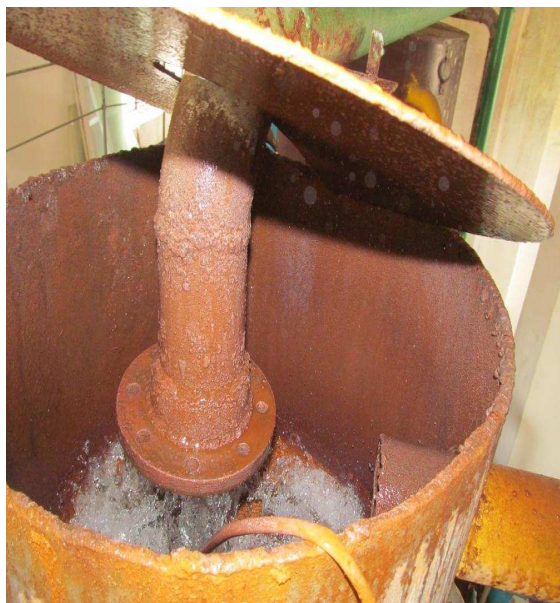


Рисунок 8 – Аэратор и воздухоотделитель



Рисунок 9 – Общий вид станции

В качестве фильтрующей загрузки использован пенополистирол заводского изготовления с такими характеристиками:  $d_{10} = 2,05$  мм;  $d_{80} = 2,46$  мм;  $d_{ЭК} = 2,8$  мм;  $k_H = 2,4$ . Во втором фильтре были сделаны пробоотборники для забора фильтрованной воды через 10, 40, 70, 100 см от нижней кромки загрузки.

Результаты наблюдений за изменением форм и концентраций железа по пути следования воды через загрузку (рис. 10) весьма сходны с результатами, полученными на Горбаковской станции, – изменения концентрации кислорода по высоте загрузки идентичны.



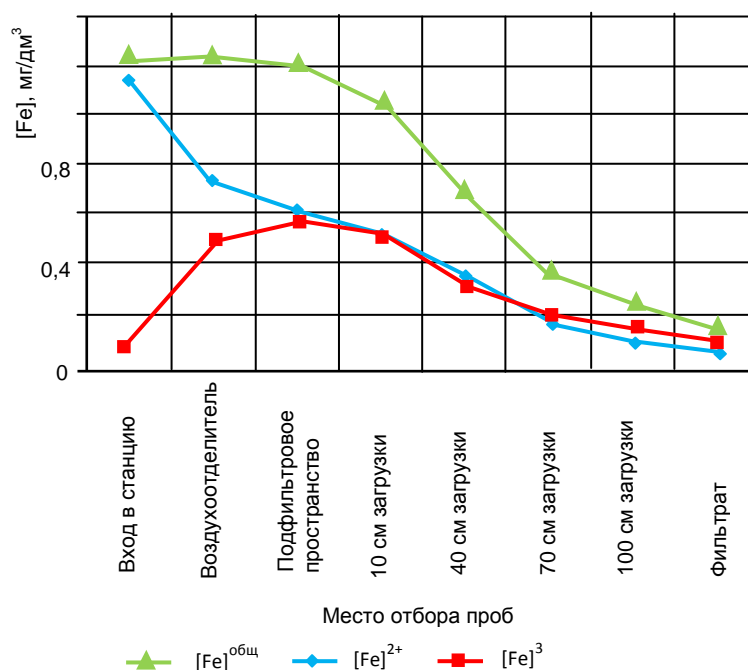


Рисунок 10 – Динамика изменения форм и концентраций железа при фильтровании через пенополистирольную загрузку

На Полоцкой фильтровальной станции для задержания окиси железа используются скорые фильтры с песчаной загрузкой диаметром 1...1,6 мм. Высота слоя загрузки поддерживается в пределах 1,7 м путем постоянного пополнения загрузки в фильтре. Фильтрация воды проводится с постоянной скоростью фильтрования в пределах 5...6 м/ч. Фильтры оборудованы пробоотборниками с отбором проб с глубины загрузки 10, 30, 130 см.

Исходная вода, проходя через эжектор (рис. 11), насыщается воздухом, и образующаяся водовоздушная смесь поступает в камеру аэрации. Камера аэрации представляет собой прямоугольный резервуар и предназначена для распределения воды между фильтрами и принудительной отгонкой выделяющихся из воды газов (сероводород, метан, аммиак). Поступающая на фильтр вода изливается с высоты 0,5 м (рис. 12), что дополнительно её обогащает кислородом воздуха. На поверхности загрузки образуется адсорбционно-каталитическая пленка из ионов и оксидов двух- и трехвалентного железа, а также из продуктов жизнедеятельности железобактерий.



1 – трубопровод исходной воды;  
2 – эжектор; 3 – камера аэрации;  
4 – воздуховод для выделяющихся газов

Рисунок 11 – Камера аэрации



Рисунок 12 – Излив воды в корпусе фильтра

Динамика изменения форм и концентраций железа по ходу движения воды представлена на рисунке 13. Изменение концентрации общего железа по высоте песчаной загрузки происходит, по сути, по тем же законам, что и на рассматриваемых выше станциях.

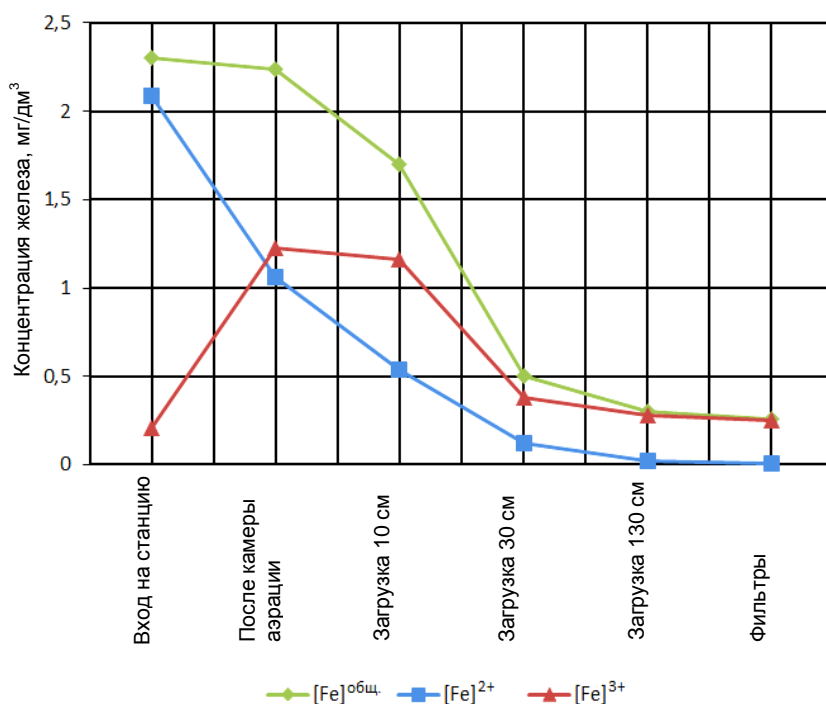


Рисунок 13 – Изменение форм и концентраций железа по высоте песчаной загрузки

Изменение концентрации растворённого кислорода в воде при её обработке проиллюстрировано на рисунке 14.

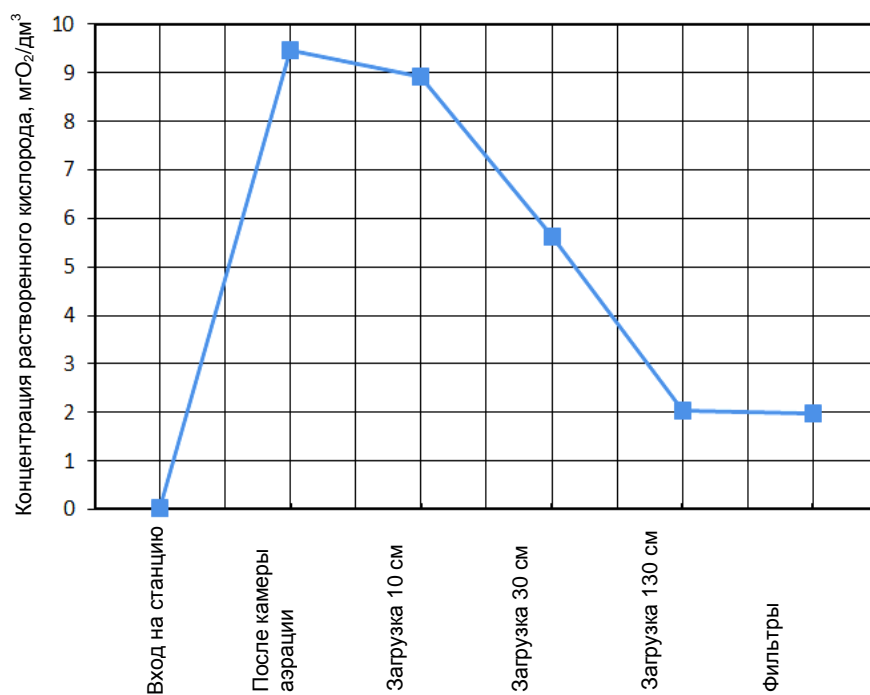


Рисунок 14 – Изменение концентрации кислорода в воде в процессе ее обработки

Концентрация кислорода после камеры аэрации, как видно из графика (см. рис. 14), достигает  $9,5 \text{ мг/дм}^3$  и далее постепенно снижается, расходуясь на окисление двухвалентного железа. Интенсивность подачи кислорода в указанных пределах практически не влияет на эффект обезжелезивания.

**Заключение.** Результаты исследований свидетельствуют о том, что при достаточной концентрации введённого кислорода процесс обезжелезивания проходит успешно в первых по ходу воды слоях любой загрузки. На практике используются различные способы введения кислорода, но предпочтительность отдается двухступенчатой аэрации благодаря её преимуществам перед другими.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кульский, Л.А. Технология очистки природных вод / Л.А. Кульский, П.П. Строкач. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Выш. шк., 1986. – 352 с.
2. Орлов, В.О. Водопостачання та водовідведення / В.О. Орлов, Я.А. Тугай, А.М. Орлова. – Киев: Знання, 2011. – 359 с.
3. Орлов, В.О. Водоочисні фільтри із зернистою засипкою / В.О. Орлов. – Рівне: НУВГП, 2005. – 163 с.
4. Орлов, В.О. Знезалізнєння підземних вод спрощеною аерацією та фільтруванням / В.О. Орлов. – Рівне: НУВГП, 2008. – 158 с.
5. Орлов, В.О. Аераційні методи знезалізнєння води / В.О. Орлов, С.Ю. Мартынов // «Вода та водоочисні технології». – К.: НТУ «Київський політехнічний університет», 2011. – С. 42–52.
6. Очистка природных вод на пенополистирольных фильтрах / под ред. В.О. Орлова. – Рівне: НУВГП, 2012. – 172 с.
7. Epuration des eaux avec des filtres composés des billes de polystyrene Expans / V. Orlov [et al.]; Revue semestrielle internationale scientifique et technique // Ecole nationale superieur d'hydraulique. – 2013. – Algerie. – № 22. – С. 68–78.

Поступила 27.10.2015

#### STUDY AERATION SYSTEM WATER AT THE DEIRONING

**V. ORLOV, A. ORLOVA, D. KOMOROWSKI**

*The results of years of research on the process of iron removal stations operating in Ukraine and Belarus. The studies were conducted on the filter with sand, gravel and floating polystyrene. It is proved that the iron removal of underground water with a low concentration of iron is important to provide sufficient aeration of the water before entering it in the boot, in which the process of detention iron hydroxide passes identical in all of the types of downloads.*